

Efeito da carbonatação na difusão de cloretos através de misturas cimentícias com cinzas volantes

Raphaele Malheiro¹, João Pinto¹, Aires Camões¹ e Gibson Meira²

RESUMO

A incorporação de resíduos e subprodutos industriais aos betões tem sido uma das alternativas encontradas para tentar reduzir o consumo mundial de cimento e, consequentemente, torná-lo um produto mais eco-eficiente. Neste sentido, e sabendo que um betão durável também promove a eco-eficiência do material, o trabalho em causa investiga a durabilidade de materiais cimentícios com incorporação de cinzas volantes (CV) face à ação combinada da penetração de cloretos e da carbonatação.

O aumento da quantidade de aluminatos proporcionada pela substituição de cimento por CV é um dos fatores que conduz a diminuição da quantidade de cloretos livres uma vez que os aluminatos reagem quimicamente com os cloretos. Por outro lado, devido às reações pozolânicas, inerentes à utilização de CV, o Ca(OH)_2 presente na matriz é consumido, facilitando o avanço da frente de carbonatação. Muito pouco é conhecido acerca da ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos em materiais cimentícios contendo CV.

Para este estudo, foram moldados provetes em argamassa contendo 20 e 40% de CV em substituição da massa de cimento CEM I 42.5R e relação água/ligante 0,50. Após 90 dias de cura e 15 dias de pré-condicionamento, os provetes foram introduzidos na câmara de carbonatação (20°C, 55% de HR e 4% de CO_2) onde permaneceram por 15, 60 e 90 dias. Terminado o período de carbonatação, os provetes foram submetidos ao ensaio de difusão de cloretos por migração com base na especificação LNEC E 463.

Os resultados sugerem que as argamassas carbonatadas apresentam um coeficiente de difusão de cloretos diferente do alcançado para as argamassas que não sofreram carbonatação, independentemente da percentagem de CV. Esta diferença deve ser tida em consideração, principalmente, em ambientes sujeitos à ação dos cloretos e, ao mesmo tempo, fortemente contaminados com CO_2 .

Palavras-chave: Materiais cimentícios, Materiais eco-eficientes, Cinzas volantes, Carbonatação, Difusão de cloretos.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Torgal e Jalali (2011) [1], os materiais de construção eco-eficientes são aqueles que, entre várias alternativas possíveis, apresentam um menor impacto ambiental. Dito isto, é possível inferir que materiais cimentícios como, por exemplo, o betão ou a argamassa, ao substituírem parte do cimento por resíduos ou subprodutos industriais, podem ser considerados, em determinadas situações, materiais cimentícios eco-eficientes.

¹Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC) - Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. raphamalheiro@gmail.com, jlgp1.5@gmail.com e aires@civil.uminho.pt.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, Brasil. gibsonmeira@yahoo.com.

A fim de tornar as estruturas de betão mais sustentáveis desde a fase de conceção, a incorporação de resíduos ou subprodutos industriais à sua composição tem sido cada vez mais comum. No caso da incorporação de cinzas volantes (CV), além de imprimirem um caráter sustentável ao betão, estas cinzas têm sido frequentemente utilizadas com o objetivo de tornar a matriz mais resistente à ação dos cloretos [2]. Jung *et al.* (2007) [3], por exemplo, estudaram misturas de betão com substituição de cimento, em massa, por 0% e 20% de CV concluindo que misturar CV ao betão é extremamente eficaz para a prevenção da penetração de iões cloreto. O mesmo foi confirmado por outros autores [4, 5, 6].

Entretanto, no que diz respeito à carbonatação, quando se fala em incorporação de CV por substituição do cimento, existe um efeito duplo resultante do emprego destas adições. Se por um lado a redução da permeabilidade reduz a penetração do dióxido de carbono na estrutura, por outro, as reações pozolânicas, e o consequente consumo de hidróxido de cálcio, diminuem a reserva alcalina do betão, resultando numa frente de carbonatação mais rápida quando comparada aos betões fabricados sem esta adição [7, 8].

O efeito combinado dos mecanismos de degradação do betão é uma realidade e é um tema que tem tido maior atenção da comunidade científica [2, 9, 10], especialmente, a partir dos anos 2000. Apesar dos estudos até agora desenvolvidos, ainda não há consenso sobre os resultados que esta sinergia, provocada pela ação simultânea de cloretos e da carbonatação, pode trazer para a durabilidade do betão.

Montemor *et al.* (2002) [11] estudaram o efeito da adição de CV no processo de corrosão em argamassas expostas, simultaneamente, aos cloretos e à carbonatação. Para tal, moldaram amostras com 0%, 15% e 30% de CV, em massa, para substituir o uso do cimento. Tendo decorrido durante 4 meses, o ensaio contou com duas abordagens, uma na câmara de carbonatação, num ambiente com 5% de CO₂ e 15% de NaCl em forma de *spray* e outra, em ambiente de laboratório (carbonatação natural) e, semanalmente, expostos a 15% de NaCl em forma de *spray*. Terminado o período de ensaios, traçaram o perfil de cloretos e chegaram à conclusão de que a adição de CV em ambientes contendo cloretos é de todo benéfica. Contudo, se este ambiente além de conter cloretos for fortemente poluído por CO₂, a incorporação de CV pode acelerar o processo de corrosão.

Com o mesmo objetivo, Malheiro *et al.* (2014) [12], avaliaram uma matriz cimentícia contendo cinzas volantes quanto à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto. Foram moldados provetes com 40% de CV (em substituição da massa de ligante). Após 90 dias de cura os provetes foram submetidos a 12 ciclos de imersão (3,50% NaCl)/secagem (4% CO₂) e 12 ciclos de referência, perfazendo um total de 168 dias de ensaio. Os resultados indicaram que os provetes submetidos à ação combinada apresentam um perfil de cloretos com teores superiores quando comparados à ação exclusiva destes iões.

Face ao exposto, e tendo em conta que a durabilidade das estruturas está intrinsecamente ligada à sua sustentabilidade, o principal objetivo deste estudo é estudar o efeito da carbonatação na difusão de cloretos em materiais cimentícios eco-eficientes, neste caso, materiais cimentícios com incorporação de CV.

2. PROCEDIMENTO LABORATORIAL

2.1 Materiais e composição em estudo

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de materiais ligantes: cimento Portland CEM I 42.5R e cinzas volantes. As CV utilizadas foram provenientes do Departamento de Carvão e Cinzas da PEGOP Energia Elétrica, S.A, são resultado da queima de carvão de origem Sul-africana e Colombiana e sua composição química pode ser vista no Quadro 1. Já a composição química do cimento pode ser vista no Quadro 2.

Quadro 1. Composição química das cinzas volantes.

SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	K_2O [%]	Na_2O [%]	TiO_2 [%]	P_2O_5 [%]	Perda ao fogo [%]	Restantes elementos [%]
55,10	26,60	5,70	2,58	1,30	1,41	0,26	1,33	0,73	3,07	1,92

Quadro 2. Composição química do cimento.

SiO_2 [%]	Al_2O_3 [%]	Fe_2O_3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	SO_3 [%]	K_2O [%]	Na_2O [%]	Cl^- [%]	Perda ao fogo [%]	Resíduo insolúvel [%]	Restantes elementos [%]
20,33	4,59	3,06	62,30	2,12	3,10	0,76	0,19	0,07	1,78	1,21	0,49

Foram utilizados agregados finos com um módulo de finura de 5,04 e agregados grossos com um tamanho máximo de 12,70 mm. Nas amassaduras foi utilizada água da rede pública de abastecimento da cidade de Guimarães - Portugal, uma vez que a mesma costuma apresentar um teor de cloretos bastante reduzido, inferior a 10 mg/l Cl^- .

2.2 Moldagem dos provetes

Com o objetivo de acelerar os efeitos causados pela carbonatação e pela ação dos cloretos, optou-se por utilizar provetes em argamassa em detrimento aos provetes em betão uma vez que estes apresentam uma rede porosa mais compacta do que os provetes em argamassa.

Foram estudadas argamassas com diferentes percentagens de substituição de cimento por CV, designadamente, 20 e 40%. A razão mássica utilizada foi de 1:3 de ligante e areia. Para determinação da razão água/ligante, foi fixado o espalhamento na ordem dos 180 mm, para o qual foi utilizado um processo iterativo, sendo adicionados 0,20 l de água até o espalhamento pretendido ser alcançado. Desta forma, para a argamassa com 20% de CV obteve-se uma relação a/l igual a 0,51 e para a argamassa com 40% de CV obteve-se uma relação água/ligante igual a 0,50. O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com a EN 1015-3 (2004) [13].

As dimensões dos provetes foram definidas tendo em conta os ensaios acelerados utilizados. Assim, após a sua execução, a argamassa foi colocada em moldes com $\varnothing 100 \times 50 \text{ mm}^2$, que permaneceram 24 horas em câmara húmida, protegidos com película plástica para dificultar a evaporação da água da mistura. Em seguida, os provetes foram desmoldados e imersos em água, durante 90 dias, potenciando, assim, o desenvolvimento das reações pozolânicas inerentes à utilização das CV.

2.3 Ensaios acelerados utilizados

A fim de estudar o efeito da carbonatação sobre a difusão de cloretos em argamassas com CV, foram utilizados dois tipos de ensaios acelerados, a carbonatação acelerada e a difusão de cloretos por migração. Estes ensaios serão comentados nos itens a seguir.

Vale referir que, de forma a alcançar os objetivos pretendidos, os provetes foram submetidos primeiro ao ensaio de carbonatação e, em seguida, ao ensaio de penetração de cloretos.

2.3.1 Carbonatação acelerada

Após o período de cura, com o objetivo de equilibrar a humidade entre o provete e o ambiente, optou-se por utilizar uma etapa de pré-condicionamento que antecederesse o ensaio de carbonatação. Para tal, os provetes estiveram em ambiente laboratorial durante um período de 15 dias, com temperatura e humidade monitoradas ($23^\circ\text{C} \pm 2$ e $70\% \pm 2$).

Terminado o pré-condicionamento, os provetes foram revestidos com parafina (Figura 1) de modo a que a carbonatação ocorresse unidireccionalmente, ou seja, a face superior e a lateral foram pintadas,

deixando a base por pintar de modo a permitir a entrada de CO_2 pela mesma. Após o processo de pintura, os provetes repousaram em ambiente de laboratório por 24 horas, sendo, de seguida, introduzidos na câmara de carbonatação.



Figura 1. Provetes revestidos com parafina.

O ensaio de carbonatação propriamente dito foi desenvolvido com base na CEN/TS12390-12-FinalDraft, 2010 [14], adotando os seguintes parâmetros: 20°C , 55% de HR e 4% de CO_2 . Os provetes estiveram em câmara de carbonatação por três períodos: 15, 60 e 90 dias. Em seguida, o revestimento em parafina foi removido para que os provetes pudessem seguir para o ensaio de difusão de cloretos por migração.

Importa dizer que, para garantir que nenhum resíduo de parafina, que, por ventura, tenha penetrado de maneira um pouco mais profunda do que a superfície e permanecesse na face do provete, procedeu-se a uma retificação da face que estava coberta com parafina (Figura 2). A face através da qual houve a penetração do CO_2 , que é a mesma face por onde haverá a penetração de Cl^- , não foi retificada.



Figura 2. Retificação da face do provete que esteve revestida com parafina.

2.3.2 Difusão de cloretos por migração

Após o período de carbonatação estudado, os provetes em argamassa foram ensaiados com base no ensaio acelerado de difusão de cloretos por migração, descrito na especificação LNEC E463 (2004) [15]. Para as amostras do grupo I, a parafina foi removida e, em seguida, todas as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração de cloretos.

Assim, as amostras foram previamente saturadas numa solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sob condições de vácuo e armazenadas na mesma solução durante $18 \pm 2\text{h}$. Posteriormente, foi montado o esquema de ensaio como o representado na Figura 3. A solução catódica é uma solução a 10% em massa de NaCl em água, sendo a solução anódica uma solução de NaOH 0,3 N em água destilada. A duração do ensaio e voltagens aplicadas foram determinadas com base na corrente inicial pré-estabelecida de 30 V [15].

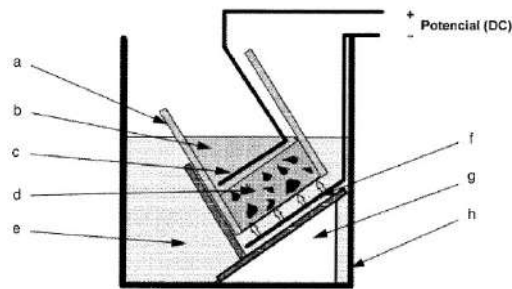


Figura 3. Esquema de montagem de ensaio, onde: a - manga de borracha, b - solução anódica, c - ânodo, d - provete, e - solução catódica, f - cátodo, g - suporte, h - reservatório catódico [15].

No final do ensaio, as amostras foram partidas diametralmente e de forma perpendicular à direção da penetração dos agentes agressores, CO_2 e Cl^- . Para os provetes submetidos à ação combinada, as metades foram usadas de diferentes maneiras: a primeira foi aspergida com uma solução de fenolftaleína (1% álcool etílico a 70%) [16], a fim de determinar a frente carbonatada; e a segunda foi aspergida com 0,1 N de AgNO_3 , a fim de determinar a profundidade de penetração dos cloretos (Figura 4). Para os provetes de referência, submetidos apenas à ação dos cloretos, as duas metades foram aspergidas apenas com a solução de AgNO_3 0,1 N. As profundidades de cloretos registadas, foram usadas para determinar o coeficiente de difusão dos iões Cl^- através da equação indicada em [15].

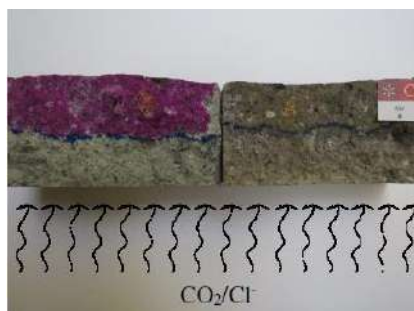


Figura 4. Determinação da profundidade de carbonatação (esquerda) e da profundidade de penetração de cloretos (direita), após a conclusão do ensaio combinado [17].

Importa referir que os provetes de referência estiveram em ambiente de laboratório, devidamente protegidos do contato com o CO_2 , durante todo o período em que os demais provetes estiveram em câmara de carbonatação.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Provetes de referência - apenas penetração de cloretos

As Figuras 5 e 6 apresentam os valores de coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, D , obtidos após os provetes terem estado meio, dois e três meses acondicionados em ambiente de laboratório e, em seguida, terem sido submetidos ao ensaio de migração de cloretos.

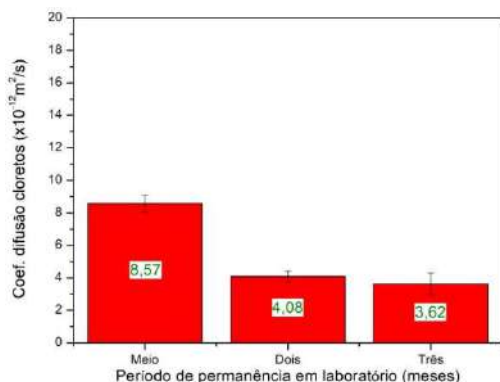


Figura 5. Coeficiente de difusão de cloretos obtidos para provetes de referência com 20% de CV.

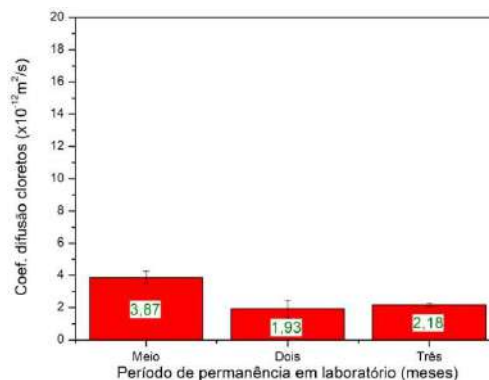


Figura 6. Coeficiente de difusão de cloretos obtidos para provetes de referência com 40% de CV.

As Figuras 5 e 6 deixam claro que o aumento na incorporação de CV diminui o coeficiente de difusão de cloretos para todos os períodos estudados.

Sobre a variação de D com o período de ensaio, observa-se uma redução nos valores de D obtidos para dois e três meses de ensaio quando comparados aos valores obtidos para 15 dias de ensaio. Este comportamento verifica-se para as duas composições estudadas apesar de ser mais evidente para os provetes com incorporação de 20% de CV, onde a diferença de valores verificada entre 15 dias e 3 meses de ensaio é de, aproximadamente, $5,00 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.2 Provetes submetidos à ação combinada - carbonatação seguida de penetração de cloretos

3.2.1 Carbonatação

O Quadro 3 apresenta os valores de carbonatação obtidos para os três diferentes períodos estudados.

Quadro 3. Profundidade de carbonatação obtida para os provetes submetidos à ação combinada.

Nome	Profundidade de carbonatação (mm)					
	0,5 mês	Cov (%)	2 meses	Cov (%)	3 meses	Cov (%)
Argamassa 20% CV	5,98	19,06	9,82	10,69	13,67	11,99
Argamassa 40% CV	12,37	10,51	17,59	8,81	21,53	8,55

Os valores de profundidade de carbonatação apresentados no quadro acima deixam claro que, independentemente da quantidade de CV utilizada, há um aumento na profundidade de carbonatação com o aumento do período de exposição ao CO_2 . Este comportamento vai ao encontro dos resultados encontrados na literatura [7, 18].

3.2.2 Penetração de cloretos

As Figuras 7 e 8 apresentam os valores de coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, D, obtidos após os provetes terem estado meio, dois e três meses em câmara de carbonatação e, em seguida, terem sido submetidos ao ensaio de migração de cloretos.

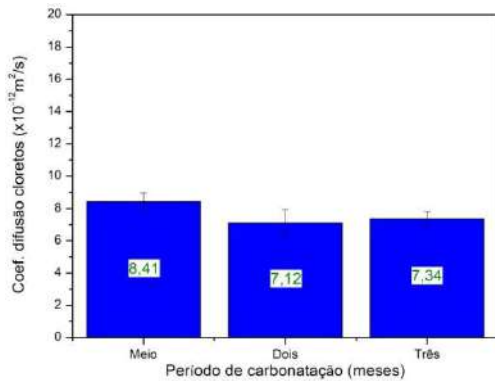


Figura 7. Coeficiente de difusão de cloritos obtidos para provetes com 20% de CV, submetidos à ação combinada.

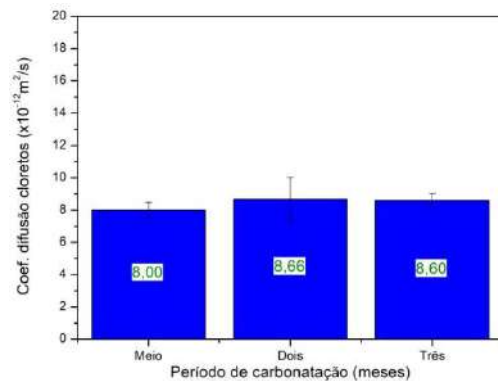


Figura 8. Coeficiente de difusão de cloritos obtidos para provetes com 40% de CV, submetidos à ação combinada.

As Figuras 7 e 8 mostram, ao contrário do esperado, uma diferença pouco significativa nos valores de D obtidos para as diferentes percentagens de incorporação de CV. Sobre a variação de D com o período de ensaio, pode-se dizer que não há uma tendência clara de comportamento. Na verdade, os valores mantêm-se algo estáveis ao longo dos períodos estudados. O reduzido intervalo de tempo entre os períodos estudados poderá estar na causa deste comportamento de proximidade entre valores.

3.3 Comparação entre resultados

O cruzamento entre os resultados de coeficiente de difusão de cloritos obtidos para os provetes submetidos à ação combinada e para os provetes de referência podem ser vistos nas Figuras 9 e 10.

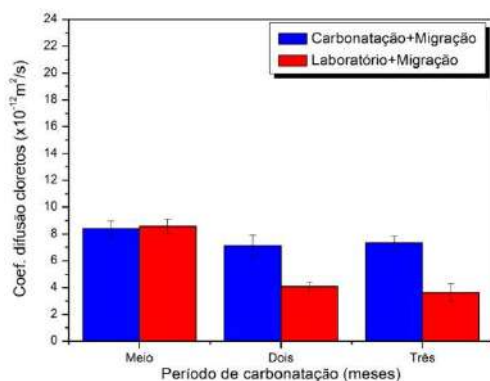


Figura 9. Coeficiente de difusão de cloritos obtidos para provetes com 20% de CV.

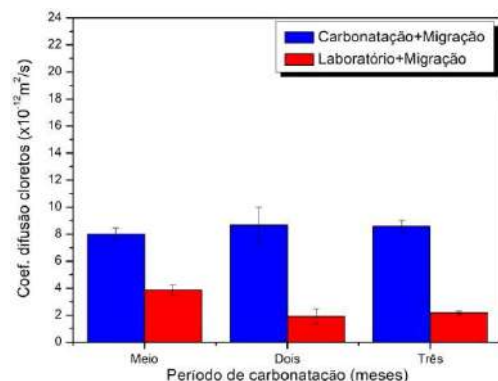


Figura 10. Coeficiente de difusão de cloritos obtidos para provetes com 40% de CV.

Ao analisar a Figura 9 observa-se que os provetes com 20% de CV, logo nos primeiros 15 dias de ensaio, atingem coeficientes de difusão semelhantes tanto para o caso de referência quanto para a ação combinada. A maior diferença no comportamento destes provetes reside no fato de haver uma redução significativa no valor do coeficiente de difusão, com o aumento no período de ensaio, para o caso dos provetes de referência, enquanto que para os provetes submetidos à ação combinada esta redução é pouco expressiva. Já para os provetes com 40% de CV, Figura 10, observa-se que os provetes submetidos à ação combinada atingem valores de coeficientes de difusão superiores aos provetes de referência logo nos 15 dias de ensaio e, neste caso, estes valores tendem a manter-se algo estável com o aumento do período de ensaio.

De maneira geral é possível perceber um aumento do coeficiente de difusão de cloritos para as argamassas sujeitas à ação combinada, quando comparadas com as argamassas de referência, independentemente de quantidade de CV incorporadas. Contudo, este aumento no coeficiente de

difusão é mais perceptível para as argamassas com maior incorporação de CV, ou seja, 40%. Neste caso, para os provetes submetidos a três meses de ensaio, observa-se um aumento de quase quatro vezes neste coeficiente.

De acordo com estes resultados, as argamassas com CV têm a sua resistência à penetração de cloretos bastante reduzida quando os provetes, além de estarem inseridos em ambientes com cloretos, estão, também, fortemente sujeitos à ação do CO_2 . Esta situação pode ocorrer em alguns microclimas específicos como, por exemplo, em viadutos com elevado tráfego de automóveis e que, ao mesmo tempo, encontra-se sujeito à utilização de sais de degelo. Além disso, é importante lembrar que apesar das condições necessárias para a penetração máxima de cloretos e a ocorrência da carbonatação serem bastante diferente (poros saturados e poros parcialmente preenchidos, respetivamente), as diferentes estações do ano podem proporcionar condições para as duas situações ocorrerem numa mesma estrutura. Assim sendo, utilização de CV em materiais cimentícios que possam estar sujeitos à ação combinada dos cloretos e da carbonatação deve ser feita com parcimónia.

Importa lembrar que as condições aceleradas assumidas nos ensaios, apesar de buscarem semelhança à realidade, criam um ambiente próprio, onde a dinâmica dos fenómenos envolvidos pode ser bastante diferente. Dessa forma, comparações entre os resultados aqui apresentados e aqueles obtidos em exposições reais devem ser feitas com cautela. Além disso, é evidente que para tornar mais robustas as afirmações aqui apresentadas, são necessários estudos mais aprofundados que utilizem, por exemplo, maiores períodos de ensaio e diferentes percentagens de CV. Esta investigação apenas colabora com o longo e importante caminho que ainda precisa ser feito nesta área do conhecimento.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que, para as argamassas com CV, sob as condições estudadas, a carbonatação exerce uma forte influência sobre o coeficiente de difusão de cloretos por migração, aumentando-o, o que faz com que este tipo de material tenha a sua eficiência à penetração de cloretos reduzida face à ação combinada destes dois agentes agressores.

Estas afirmações devem ser tidas em consideração no que toca ao desenvolvimento de investigações futuras sobre o tema e, também, durante a utilização destas cinzas em materiais cimentícios inseridos em ambientes sujeitos à ação dos cloretos e, ao mesmo tempo, fortemente contaminados com CO_2 .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo suporte financeiro a esta pesquisa. Os autores agradecem ainda à SECIL pela disponibilização de cimento utilizado nesta pesquisa, à PEGOP Energia Elétrica pela disponibilização das cinzas volantes e à CIMENTEIRA DO LOURO e à BRITAMINHO pelo fornecimento dos agregados utilizados.

REFERÊNCIAS

- [1] Torgal, F; Jalali, S. (2010). A sustentabilidade dos materiais de construção. 2ª Edição. TecMinho, 460 p.
- [2] Malheiro, R.; Camacho, G.; Camões, A.; Meira, G.; Amorim, T.; Ferreira, R.; Reis, R. (2016). Influence of Carbonation on the Chloride Ion Diffusion Coefficient in Fly Ash Concrete. II International Conference on Concrete Sustainability ICCS16.
- [3] Jung, S.; Choi, Y.; Lee, B. (2007). Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete. SB07 Seoul: Proceedings of the International Conference on Sustainable Building Asia.

- [4] Chindaprasirt, P.; Chotithanorm, C.; Cao, H. T.; Sirivivatnanon, V. (2007). Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*, V. 21, pp. 353-361.
- [5] Cheewaket, T.; Jaturapitakkul, C.; Chalee, W. (2010). Long term performance of chloride binding capacity in fly ash concrete in a marine environment. *Construction and Building Materials*, V. 24, pp. 1352-1357.
- [6] Varga, I.; Spragg, R.; Bella, C.; Castro, J.; Bentz, D.; Weiss, J. (2014). Fluid transport in high volume fly ash mixtures with and without internal curing. *Cement and Concrete Composites*, V. 45, pp. 102-110.
- [7] Vaghetti, Marcos (1999). Efeitos da cinza volante com cinza da casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento Portland. Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado.
- [8] Neville, A. M. (1997). *Propriedades do concreto*. 2ª Edição. Pini, São Paulo.
- [9] Leivo, M.; Sistonen, E.; Al-Neshawy, F.; Piironen, J.; Kuosa, H.; Holt, E.; Koskinen P.; Nordqvist, C. (2011). Research Report VTT-R-09119-11: Effect of interacted deterioration parameters on service life of concrete structures in cold environments. Laboratory test results 2009 - 2011. VTT Technical Research Centre of Finland.
- [10] Malheiro, R.; Camões, A.; Ferreira, R.; Meira, G.; Amorim, T. (2014). Effect of carbonation on the chloride diffusion of mortar specimens exposed to cyclic wetting and drying. XIII International Conference on Durability of Building, Materials and Components, p.482-489.
- [11] Montemor, M.; Cunha, M.; Ferreira, M.; Simões, A. (2002). Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides. *Cement and Concrete Composites*, V. 24, pp.45-53.
- [12] Malheiro, R.; Camões, A.; Meira, G.; Amorim, M.; Ferreira, R.; Reis, R. (2014). Avaliação de Matriz Cimentícia Contendo Cinzas Volantes Frente à Ação Combinada da Carbonatação e dos Iões Cloreto. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Estrutural.
- [13] EN 1015-3. 2004, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- [14] CEN/TS12390-12-FinalDraft. 2010, Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method. Brussels: European Committee for Standardization.
- [15] E463. 2004, Betões - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [16] RILEM-CPC-18 (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth. *Material and Structures*, V. 18, pp. 453-455.
- [17] Malheiro, Raphael (2018). Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Tese de Doutoramento.
- [18] Younsi, A.; Turcry, P.; Aït-Mokhtar, A.; Staquet, S. (2003). Accelerated carbonation of concrete with high content of mineral additions: Effect of interactions between hydration and drying. *Cement and Concrete Research*, V. 43, pp. 25-33.



Grupo
Português
de Betão
Estrutural



TÉCNICO
LISBOA

ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL 2018

7 A 9 NOVEMBRO DE 2018 – LNEC – LISBOA

ATAS

ENCONTRO NACIONAL

BETÃO

ESTRUTURAL

2018

7 A 9 NOVEMBRO DE 2018 – LNEC – LISBOA

ATAS

Editor: **GPBE**

Aviso Legal

A qualidade científica e os conteúdos das comunicações são da inteira responsabilidade dos respetivos autores. O editor não aceita qualquer responsabilidade pela informação contida nas comunicações inseridas na presente publicação.

Nos termos legais em vigor é expressamente proibida a reprodução total ou parcial desta publicação, no seu todo ou em parte, não podendo ser reproduzida ou transmitida por qualquer forma ou processo eletrónico, mecânico ou outros, incluindo cópia, sem autorização expressa do editor.

Copyright © 2018 Grupo Português de Betão Estrutural
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA
email: gpbe@lnec.pt
www.gpbe.pt/

Editor: GPBE

Edição: 2018

Publicação disponível em: <https://be2018.pt/papers/>

Descritores: Estrutura de betão / Análise estrutural / Durabilidade de estruturas / Produtos de construção / Processos de construção / Reabilitação de estruturas / Material de construção / Normalização / Impacte ambiental / Congresso

Descriptors: Concrete structure / Structural analysis / Durability of structures / Construction product / Construction process / Rehabilitation of structures / Construction material / Standardization / Environmental impact / Congress

CDU: 624.07[012.4](063)(469)

ISBN: 978-989-20-9043-6

COMISSÃO ORGANIZADORA

Eduardo Júlio (Presidente)

Ana Sofia Louro

António Costa

António Pinho Ramos

Eduardo Cavaco

Hugo Costa

Inês Flores Colen

João Ramôa Correia

Jónatas Valença

Jorge Alfaiate

José Alexandre Bogas

Luís Oliveira Santos

Paulo Fernandes

Ricardo do Carmo

Sandra Neves

Cristina Ventura

COMISSÃO CIENTÍFICA

Manuel Pipa (Presidente)

Albert de la Fuente

Alexandre Portugal

Ana Sofia Louro

Ângela Nunes

António Abel Henriques

António Bettencourt Ribeiro

António Costa

António Lopes Batista

António Pinho Ramos

António Reis

António Santos Silva

Arlindo Gonçalves

Armando Rito

Augusto Gomes

Carlos Chastre Rodrigues

Carlos Félix

Carlos Martins

Carlos Pina

Carmen Andrade

David Fernández-Ordoñez

Eduardo Cansado Carvalho

Eduardo Cavaco

Eva Oller Ibars

Fernando Branco

Fernando G. Branco

Fernando Stucchi

Hugo Corres

Hugo Costa

Humberto Varum

Jaime Galvez Ruiz

Joan Ramon Casas

João Almeida

João Pires da Fonseca

João Ramôa Correia

João Veludo

Joaquim Barros

Joaquim Figueiras

Jónatas Valença

Jorge Alfaiate

Jorge de Brito

José Alexandre Bogas

José Camara

José Campos e Matos

José Luiz Antunes

José Manuel Catarino

Jose Romo Martin

José Sena Cruz

Júlio Appleton

Lluís Torres

Luciano Jacinto

Luís Bernardo

Luís Câncio Martins

Luís Machado

Luís Oliveira Santos

M. Helena Barros

Mário Pimentel

Miguel Azenha

Miguel Lourenço

Nelson Vila Pouca

Paulo Cachim

Paulo Fernandes

Paulo Helene

Paulo Lobo

Paulo Maranhã

Paulo Silveira

Pedro Cabral

Pedro Santos

Regina Souza

Ricardo do Carmo

Rui Faria

Rui Rodrigues

S. Pompeu Santos

Sandra Nunes

Sérgio Lopes

Túlio Bittencourt

Válter Lúcio

Vanderley John

PATROCÍNIOS

Tipo A



Tipo B



Tipo C/D



Tipo E



APOIOS INSTITUCIONAIS



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



ORDEM DOS
ENGENHEIROS
TÉCNICOS

Media Partner



PREFÁCIO

O Encontro Nacional Betão Estrutural 2018 (BE 2018) foi organizado conjuntamente pelo GPBE - Grupo Português de Betão Estrutural e o Instituto Superior Técnico e decorreu de 7 a 9 de Novembro de 2018, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, cumprindo assim mais um ciclo bienal, iniciado em 1986, com o primeiro Encontro Nacional de Estruturas Pré-Esforçadas, organizado pelo GPPE - Grupo Português de Pré-Esforçado.

Embora tratando-se de um encontro nacional, procurou-se estabelecer pontes entre a comunidade técnica e científica nacional e as suas congéneres de língua oficial portuguesa e espanhola, tendo incluído delegações brasileira, espanhola, angolana e moçambicana, num total de 261 participantes.

O BE 2018 foi concebido em estreito alinhamento com a missão do GPBE, grupo nacional da *fib* - *fédération internationale du béton*, de se constituir como um fórum privilegiado de divulgação e discussão das realizações mais recentes e inovadoras na área do betão estrutural, contando com três comunicações a convite sobre: o *fib* Model Code 2020, pelo Dr Stuart Matthews, *convenor* do *fib* TG 10.1; a descarbonização do sector do betão e o Laboratório Colaborativo em Tecnologias Sustentáveis do Cimento, pelos Prof. João Bordado e Prof. Rogério Colaço; e os grandes investimentos públicos no sector da construção civil no pós-2020, pelo Eng.º António Laranjo. Promoveu-se ainda o debate de ideias sobre alguns dos assuntos que presentemente mais interessam a Portugal, fomentando a interação com o público, através da realização de três Mesas Redondas sobre: as obras portuárias, moderada pelo Eng.º Fernando Oliveira; a reabilitação urbana, moderada pelo Prof. Júlio Appleton; e a ferrovia, moderada pelo Prof. Manuel Queiró. Para além destas sessões plenárias, tiveram lugar trinta sessões paralelas, desenrolando-se sempre quatro em simultâneo, sobre os quatro grandes temas do Encontro, A - Análise Estrutural, B - Materiais, C - Produtos e Processos e D – Realizações, e uma sessão especial com os candidatos seriados nos cinco primeiros lugares do Prémio Jovens Mestres.

O BE 2018 incluiu ainda a cerimónia de entrega da Medalha de Mérito do GPBE e a cerimónia de entrega do Prémio Jovens Mestres e das quatro menções honrosas e contou com o espaço da Exposição Técnica onde 15 das 27 empresas patrocinadoras do Encontro divulgaram os seus produtos e serviços. De referir ainda o apoio institucional da *fib*, do LNEC, da OE e da OET, essencial ao sucesso desta iniciativa, assim como o apoio da revista Construção Magazine, cujo N.º 87 foi inteiramente dedicado ao BE 2018, e ainda o apoio da Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas que, de igual modo, irá dedicar o próximo número ao BE 2018, num total de 18 artigos, selecionados de entre os mais relevantes dos apresentados no Encontro.

Passados os três dias do Encontro, que permitiu juntar académicos e investigadores, projetistas, construtores e outros técnicos em torno do tema do Betão Estrutural, promovendo a partilha de conhecimento, aprofundando contactos existentes e estabelecendo novas sinergias, permanecem para memória e consulta futura as presentes Atas do Encontro, as quais incluem

os artigos resultantes das 179 comunicações aceites para apresentação oral, após revisão atenta por parte dos membros da Comissão Científica.

Eduardo Júlio

Presidente da Comissão Organizadora

Manuel Pipa

Presidente da Comissão Científica

TEMAS

O Encontro BE 2018 foi organizado em torno de quatro temas gerais, englobando aspetos comuns às diferentes áreas de interesse nos domínios de atividade do GPBE:

TEMA 1 – ANÁLISE ESTRUTURAL E NORMALIZAÇÃO

- modelos simplificados de análise estrutural
- modelação numérica avançada
- caracterização experimental
- robustez estrutural
- resiliência estrutural
- comportamento aerodinâmico
- comportamento sísmico
- comportamento ao fogo
- normalização e regulamentação

TEMA 2 – MATERIAIS. DESEMPENHO, DURABILIDADE E IMPACTE AMBIENTAL

- novos cimentos, adições e adjuvantes
- caldas e argamassas
- betões de (ultra-)elevado desempenho
- betões reforçados com fibras
- betões eco-eficientes
- armaduras em aço de elevado desempenho
- armaduras em materiais compósitos

TEMA 3 – PRODUTOS E PROCESSOS. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO

- novos produtos pré-fabricados
- novos processos construtivos
- monitorização da integridade estrutural
- métodos de inspeção in situ
- sistemas de gestão de ativos
- análise do ciclo-de-vida
- proteção de estruturas de betão
- reparação de estruturas de betão
- reforço de estruturas de betão

TEMA 4 – REALIZAÇÕES. CONSTRUÇÃO E REABILITAÇÃO

- barragens
- cascas
- edifícios
- fundações
- obras ferroviárias
- obras portuárias
- pontes e viadutos
- reservatórios e silos
- túneis

ÍNDICE

SESSÃO PLENÁRIA 1

fib Model Code 2020 and Existing concrete structures – Assessment, through-life care & interventions	2
<i>Stuart Matthews</i>	

SESSÃO 1A – Realizações. Construção e reabilitação

Os projetos das barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro	19
<i>Domingos Silva Matos, Graça Maria Moura, José Carlos Paixão e Gilberto Silva Monteiro</i>	
A monitorização estrutural das barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro	29
<i>João Gomes Cunha, José Piteira Gomes, Graça Maria Moura e António Batista</i>	
A construção das barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro	39
<i>Júlio Gonçalves, Armando Camelo, Alexandre Gomes e Ricardo Pimentel</i>	
Estudos de apoio ao projeto da barragem do Baixo Sabor realizados pelo LNEC na vertente estrutural	49
<i>José Vieira de Lemos, Romano Câmara, Sérgio Oliveira e José Muralha</i>	
Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor – Central e circuitos hidráulicos do Baixo Sabor	59
<i>Manuel Moraes Sarmento, Artur Andrade e Celso Lima</i>	
Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor – Central do Feiticeiro	71
<i>Maria Eugénia Resende, Rui Almeida e Artur Andrade</i>	

SESSÃO 1B – Análise Estrutural e Normalização

Dimensionamento otimizado de vigas em concreto armado com diferentes condições de apoio	83
<i>Charles Jaster de Oliveira, Isabele Antonelli e Monique C. de Azevedo Rodrigues</i>	
Dimensionamento estrutural de edificação com diferentes tipos de betão leve	94
<i>Ivan Santos Dortas, Yuri Sotero Bomfim Fraga, Luiz Henrique Pereira Santos, Lucas de Paula Vasques e César Douglas Bezerra Dos Santos</i>	
Estudo da Influência das paredes de alvenaria de enchimento no comportamento sísmico de um edifício de 15 pisos no Nepal	103
<i>André Furtado, Hugo Rodrigues, Nelson VilaPouca, Humberto Varum e António Arêde</i>	
Efeito do confinamento e da redistribuição de momentos no comportamento de lajes fungiformes	113
<i>Ricardo Faria, Rui Marreiros, António Ramos e Gonçalo Antunes</i>	
Modelagem do comportamento estrutural de vigas de concreto armado pelo método dos elementos finitos	123
<i>Gabriela B. M. L. Albuquerque, João Paulo C. Rodrigues e Valdir Pignatta Silva</i>	
Extensão do GSVATM para vigas de betão armado sujeitas à torção combinada com esforço axial	133
<i>Cátia Taborda, Jorge Andrade e Luís Bernardo</i>	

SESSÃO 1C – Análise Estrutural e Normalização

Avaliação de resultados de ensaios cíclicos alternados sobre varões de aço para betão armado....	144
<i>António M. Baptista e João Filipe</i>	

Extensão total na força máxima de varões de aço para betão armado. Análise da sua distribuição estatística nas duas últimas décadas	154
<i>António M. Baptista e João Filipe</i>	
Deslocamentos transversais em serviço de pilar de concreto armado submetido a carregamento de curta duração com pequena excentricidade	164
<i>Sebastião Pereira, Milton Dias, Élvio Piancastelli, Thiago Bortone e Elves Farias</i>	
Método experimental para o estudo do efeito combinado de cargas aplicadas e retração impedida em lajes de betão armado	172
<i>José Gomes, Miguel Azenha, José Granja, Rui Faria, Carlos Sousa, B. Zahabizadeh, A. Edalat-Behbahani, Dirk Schlicke e Carlos Rodrigues</i>	
Ductilidade de vigas de BA: Influência do tipo de armadura.....	182
<i>Sérgio Lopes e A. V. Lopes</i>	
Resistência ao Punçoamento de Bordos de Lajes de Betão Armado	197
<i>A.V. Lopes e Sérgio Lopes</i>	

SESSÃO 1D – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Análise das vantagens do uso de concretos com maiores resistências no dimensionamento de edifícios	211
<i>G. M. Fregonezi, W. W. Wutzow e R. D. Vanderlei</i>	
Proteção de edifícios contra explosões através do reforço dos elementos estruturais com novas camadas de betões especiais	221
<i>David Nabais, Luís Cardoso, Gabriel Gomes e Eduardo Júlio</i>	
Durabilidade de betões reforçados com nanotubos de carbono de parede múltipla	231
<i>Ana Carriço, José A. Bogas, Hawreen Ahmed e Mafalda Guedes</i>	
Durabilidade de um material cimentício de ultraelevado desempenho reforçado com fibras metálicas	241
<i>Ana Mafalda Matos, Sandra Nunes, Carla Costa e José Aguiar</i>	
Modelação da anisotropia do comportamento à tração do UHPFRC	251
<i>Mário Pimentel, Aurélio Sine, Amin Abrishambaf e Sandra Nunes</i>	
Comportamento à flexão de elementos híbridos RC-UHPFRC no contexto da reabilitação e reforço de estruturas	261
<i>Aurélio Sine, Mário Pimentel, Sandra Nunes e Amin Abrishambaf</i>	

SESSÃO 2A – Realizações. Construção e reabilitação

Seismic hazard for dams in southern Spain – Application to dams with height larger than 60m and capacity of reservoir larger than 13.5km ³	272
<i>Enrico Zacchei</i>	
Alteamento e reabilitação estrutural da barragem de Bou Heurtma	280
<i>Paulo Soares, Rui Rodrigues, Cristina Costa e José Cruz Moraes</i>	
Reabilitação estrutural da barragem de Laroussia	290
<i>Paulo Soares, Rui Rodrigues, Cristina Costa e José Cruz Moraes</i>	
Projeto e Construção da Barragem de Laúca	300
<i>Sérgio Kraemer, Nuno Nunes, Cristina Costa, Acácio Santo, Elias Estêvão e Marcus Azeredo</i>	
Análise e interpretação do comportamento observado da Barragem do Baixo Sabor durante o primeiro enchimento da albufeira	311
<i>José Piteira Gomes, António Lopes Batista e João Conde Silva</i>	

SESSÃO 2B – Análise Estrutural e Normalização

Análise Comparativa de Regulamentação Internacional em Ações de Tráfego Rodoviário	322
<i>João Marrana, Nelson Vila Pouca e José Lello</i>	
Comparação das tolerâncias da Regulamentação Europeia (EC2 e Norma NP EN 13670) com as do REBAP	333
<i>Catarina Fernandes, João Vinagre e Cristina Pereira</i>	
Calibração de coeficientes parciais de segurança	342
<i>Luciano Jacinto, Luís O. Oliveira Santos e Luís C. Neves</i>	
Comportamento das lajes fungiformes de edifícios com ou sem inclusão do pré-esforço de acordo com a norma Europeia 1992 versus MC2010	350
<i>Adão António Domingos, Resende Nsambu e José Câmara</i>	
Design of fastenings for use in concrete in accordance with EC2, Part 4 (EN 1992-4)	361
<i>Yujie Li, Joana Oliveira e François Regnier</i>	
Execução de estruturas de betão – Será a EN 13670 suficiente?	370
<i>Arlindo Gonçalves e Manuel Vieira</i>	

SESSÃO 2C – Análise Estrutural e Normalização

Avaliação da aderência entre o aço e o concreto a partir da contaminação superficial das barras com agente desmoldante	379
<i>Vinissius Wendt e Jeferson Patzlaff</i>	
Influência da temperatura na aderência entre betão e laminados de fibras de carbono instalados em rasgos pela técnica NSM	389
<i>Adriana S. Azevedo, Miguel S. Oliveira, João P. Firmo e João R. Correia</i>	
Influência da temperatura elevada na aderência entre betão e varões em compósito GFRP nervurados – ensaios de arrancamento	399
<i>Inês C. Rosa, Pietro Mazzuca, João P. Firmo e João R. Correia</i>	
Influence of elevated temperatures on epoxy adhesive used in CFRP strengthening systems	409
<i>Maria G. Roquette, João P. Firmo, João R. Correia and Adriana S. Azevedo</i>	
Efeito da temperatura elevada na aderência entre betão e varões de GFRP com acabamento superficial em areia – Ensaios de arrancamento e determinação de leis tensão de aderência deslizamento	419
<i>Inês C. Rosa, João P. Firmo, João R. Correia e Joaquim A. O. Barros</i>	
Lajes de betão armadas com varões de GFRP com acabamento a areia: estudo experimental e simulação numérica	429
<i>Wallace M. Souza, Inês C. Rosa, João P. Firmo, João R. Correia, Pedro Santos e João Almeida</i>	

SESSÃO 2D – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Microstructural analysis of cement paste: experimental and numerical investigation	440
<i>Hadi Mazaheripour, Amin Abrishambaf, Rui Faria, Miguel Azenha e Guang Ye</i>	
Caracterização mecânica de argamassas produzidas com cimento reciclado de baixo carbono termicamente reativado	450
<i>Alexandre Bogas, Ana Carriço e Manuel Pereira</i>	
Valorização de resíduos de biomassa e da extração de pedra natural no fabrico de betão autocompactável	460
<i>Gemma Rojo-López, Sandra Nunes, Fernando Martínez-Abella e Belén González-Fontelbo</i>	
Cimentos de baixa emissão de CO ₂ com incorporação de misturas de resíduo caulínico e calcário	470
<i>Euler Arruda, Jefferson Lima e Márcio Barata</i>	

Quantificação das fases vítrea e cristalina das cinzas volantes por dissolução seletiva com ácido fluorídrico	481
<i>R. Cunha Reis, Manuel J. P. Ribeiro, João C.C. Abrantes e Aires Camões</i>	
Avaliação do comportamento mecânico de um novo ligante hidráulico amorfo de rácio Ca/Si = 1.1	491
<i>Mariana Pinha, Hugo Costa, Rodrigo Santos, João Pereira, Ricardo B. Horta, Rogério Colaço e Eduardo Júlio</i>	

SESSÃO 3A – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Utilização da plataforma Arduino para monitoramento de deformações e deslocamentos em viga de concreto armado	502
<i>Joao Batista Lamari Palma E Silva, Ana Elisabete Jacintho, Nadia Cazarim Forti e Lia Lorena Pimentel</i>	
Controle tecnológico do concreto e suas repercussões na avaliação da confiabilidade de pilares de concreto armado	512
<i>Fábio Magalhães, Mauro Real e Luiz Carlos Silva Filho</i>	
Monitorização da integridade estrutural: técnicas de deteção de dano aplicadas a um modelo laboratorial	522
<i>Lucas Corrêa C. de Lima, Carlos Rodrigues e Carlos Félix</i>	
Métodos de identificação modal no domínio do tempo Testes numéricos e aplicação à Barragem do Cabril	532
<i>Matilde Freitas, Ana Prior e Sérgio Oliveira</i>	
Monitorização dos efeitos estruturais das reações expansivas do betão nas pontes do Criz II e de São João das Areias	542
<i>Luís Oliveira Santos, Min Xu e Luis Freire</i>	
Sensores de betão com adição de negro de fumo	550
<i>Emanuel Pereira e Paulo Cachim</i>	

SESSÃO 3B – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Estimativa semi-probabilística da vida útil de betões estruturais de agregados leves sujeitos a corrosão induzida por carbonatação	559
<i>Sofia Real e José Alexandre Bogas</i>	
Análise da microdureza de matrizes cimentícias com materiais pozolânicos	569
<i>Carla Mabel Medeiros de Albuquerque E Silva, Yuri Sotero Bomfim Fraga, Ivan Santos Dortas, Luiz Henrique Pereira Santos e César Douglas Bezerra Dos Santos</i>	
Efeito da carbonatação na difusão de cloretos através de misturas cimentícias com cinzas volantes	579
<i>Raphaelle Malheiro, João Pinto, Aires Camões e Gibson Meira</i>	
Caracterização e incorporação de cinzas volantes de biomassa em argamassas	588
<i>Elisabete Teixeira, Aires Camões e Fernando Branco</i>	
Influência da adição de pozolanas naturais e de cinzas de combustão no desempenho de betões eco-eficientes com baixo teor de cimento	598
<i>Keila Robalo, Hugo Costa, Ricardo do Carmo e Eduardo Júlio</i>	
Desenvolvimento de Método para Ensaio de Difusão com Variação do Grau de Saturação em Concretos Revestidos com Argamassa	608
<i>Franklin Luiz Fonseca, Jorge Luiz Saes Bandeira, André Tavares da Cunha Guimarães, Margarete Regina Freitas Gonçalves</i>	

SESSÃO 3C – Análise Estrutural e Normalização

Relação entre a resistência à tração e a tensão de cedência dos aços de varões para armaduras de betão armado. Análise da sua distribuição estatística nas duas últimas décadas	619
<i>António M. Baptista e João Filipe</i>	
Fios de aço para pré-esforço. Controlo da sua ductilidade através de ensaios de dobragem alternada no âmbito de ações de certificação	629
<i>António M. Baptista e João Filipe</i>	
Método alternativo para avaliação da aderência de varões nervurados de acordo com as Especificações LNEC	639
<i>Ana S. Louro, Manuel Pipa e António M. Baptista</i>	
Compósitos cimentícios armados com fios de carbono – Avaliação experimental da armadura mínima de tração	650
<i>Diogo Felícissimo e Rui Neves</i>	
Influência da resistência do betão e da rigidez e rugosidade dos agregados nas resistências à compressão e à tração da ITZ agregados/matriz ligante	660
<i>Tiago Simões, Hugo Costa e Eduardo Júlio</i>	
Determinação de coeficientes de rugosidade de interfaces betão-betão através de ensaios de corte inclinado de ângulo variável	670
<i>José Maria Raposo, Luís Costa Neves e Eduardo Júlio</i>	

SESSÃO 3D – Análise Estrutural e Normalização

Metodologia para a previsão da resistência do betão de barragens usando modelos analíticos	681
<i>Carlos Serra, António Lopes Batista, Nuno Monteiro Azevedo e João Custódio</i>	
Modelação da fendilhação por origem térmica de uma barragem de betão em arco	691
<i>Nuno Monteiro Azevedo, Eloisa Castilho, Noemi Schclar Leitão, Maria Luísa Braga Farinha e Romano Câmara</i>	
Modelos de elementos discretos na determinação da forma de cascas	701
<i>Vítor Dias Da Silva e Tatiana Sá Marques</i>	
Desenvolvimento de uma metodologia para a simulação do efeito das serpentinas de refrigeração: Aplicação a uma barragem abóbada durante a construção	711
<i>José Conceição, Rui Faria, Miguel Azenha e Manuel Miranda</i>	
Modelos de contacto com enfraquecimento na análise de estabilidade de barragens gravidade	721
<i>Patrícia Lopes Reis, Nuno Monteiro Azevedo, Maria Luísa Braga Farinha e João Rocha de Almeida</i>	

SESSÃO 4A – Realizações. Construção e reabilitação

Pavilhão João Rocha em Lisboa – Estrutura de betão armado	732
<i>Nuno Travassos, Rui Pombo, Hugo Rodrigues e João Appleton</i>	
Inelastic static analysis to estimate the displacement performance for pile-supported wharves	742
<i>Enrico Zacchei, Pedro Lyra e Fernando Stucchi</i>	
Análise multicritério para apoio à decisão em intervenções de obras marítimo-portuárias: Estudo de quebra-mares de talude de blocos de betão e enrocamento	751
<i>Rodrigo Giollo, Maria João Falcão, Rute Lemos e Paula Couto</i>	
Terminal de contentores - Muro cais e tratamento terrenos	761
<i>Rui Tomásio, Alexandre Pinto e António Cristóvão</i>	
Edifício Batista Russo em Lisboa. Reabilitação e Reforço Estrutural	771
<i>José Delgado, Rui Barreiros e Jorge Francisco</i>	
A cúpula de betão e a conclusão das obras de Santa Engrácia	783
<i>Adriana Monteiro, António Sousa Gago e Eduardo Júlio</i>	

SESSÃO 4B – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Análise da implementação da metodologia BIM no projecto de estruturas	794
<i>Alcínia Zita Sampaio, João Nuno Novais e João Diniz Oliveira</i>	
Estado de Arte sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das Estruturas de Concreto Armado	803
<i>Ricardo Bento e João Adriano Rossignolo</i>	
Análise do consumo de betão e aço em blocos de fundação	813
<i>Ana Carolina Reis Lozovey e Fernanda João</i>	
Comportamento bifásico de betões estruturais de agregados leves sujeitos a carbonatação	823
<i>Sofia Real e José Alexandre Bogas</i>	
Definição de um Sistema de Gestão de Ativos aplicado a Instituições Públicas de Investigação	834
<i>Catarina Simões, Maria João Silva e Paula Couto</i>	
Carbonation and Environmental Impact of Concrete	844
<i>Isabel Martins e Arlindo Gonçalves</i>	

SESSÃO 4C – Análise Estrutural e Normalização

Análise numérica e experimental de blocos de fundação com cálice embutido	853
<i>Rodrigo Barros, Fabiana Stripari Munhoz, José Samuel Giongo e Daniel Nelson Maciel</i>	
Avaliação de tipologias de modelos de escoras e tirantes através de análise de fiabilidade	863
<i>J.C. Pantoja, H. Varum e A.B. Henriques</i>	
Influência da distribuição transversal de armaduras longitudinais junto ao pilar na resistência ao punçoamento	873
<i>Ricardo Faria, Catarina Jesus, Rui Marreiros e António Ramos</i>	
Análise da estabilidade da via balastrada num viaduto com tabuleiro misto aço-betão para tráfego de comboios de alta velocidade	883
<i>Artur Silva, Gonçalo Ferreira e Rui Calçada</i>	
Confiabilidade em Estruturas de Concreto Armado: Estudo Comparativo entre Análises no Estado Limite Último e por Segurança Global	893
<i>Claudia Interlandi, Luiz Fernando Martha e Sergio Hampshire C. Santos</i>	
Avaliação do desempenho de pontes rodoviárias segundo indicadores de robustez e risco face a erros de projeto e construção	903
<i>Neryvaldo Galvão, José C. Matos e Daniel V. Oliveira</i>	

SESSÃO 4D – Realizações. Construção e reabilitação

Análise térmica de barragens de betão em fase de exploração – aplicação à barragem do Alto Rabagão	914
<i>Eloísa Castilho, Nuno Monteiro Azevedo, Noemi Schclar Leitão, Luísa Braga Farinha e Romano Câmara</i>	
Análise do Comportamento de Barragens de Betão tendo em conta o Efeito das Expansões. Modelos de Separação de Efeitos do tipo HSCT	924
<i>Miguel Rodrigues e Sérgio Oliveira</i>	
Monitorização de deslocamentos em grandes barragens utilizando GNSS. Aplicação à barragem do Cabril	934
<i>Rodrigo Moraes, Sérgio Oliveira e José Nuno Lima</i>	
Comportamento de barragens abóbada para o cenário de decréscimo da resistência. Utilização de um modelo de dano desenvolvido em MATLAB	944
<i>André Alegre, Sérgio Oliveira e Margarida Espada</i>	
Análise e interpretação do comportamento observado da barragem de Pretarouca durante o primeiro enchimento da albufeira e o primeiro período de exploração	954
<i>Ivo Figueiredo Dias, António Lopes Batista e José Boal Paixão</i>	

SESSÃO 5A – Realizações. Construção e reabilitação

Linha de Évora. Troço Évora Norte – Linha do Leste. Obras de Arte Especiais	965
<i>Paulo Jorge Osório Tavares</i>	
Management of highway bridges affected by delayed ettringite formation pathology	974
<i>Nicolas Bardou</i>	
Reabilitação, Reforço Estrutural e Aumento de Segurança em Viadutos de Auto-Estradas	984
<i>Pedro Cabral, Susana Bispo e Armando Rito</i>	
O Projecto e a Construção da Ponte sobre o Rio Cuito, em Angola	994
<i>Luís Xavier, Pedro Cabral e Armando Rito</i>	
Reabilitação e Beneficiação da Ponte sobre o Rio Arda, em Pedorido	1005
<i>Francisco Virtuoso e Augusto Gomes</i>	

SESSÃO 5B – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Avaliação da sustentabilidade de colunas tubulares mistas aço-betão com agregados de borracha	1016
<i>António Duarte, Nuno Silvestre, Jorge de Brito, Eduardo Júlio e José Silvestre</i>	
Dimensionamento de colunas curtas tubulares mistas aço-betão com agregados de borracha submetidas a flexão cíclica composta com compressão	1026
<i>António Duarte, Nuno Silvestre, Jorge de Brito e Eduardo Júlio</i>	
Betões eco-eficientes com baixo teor de cimento e com agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição	1036
<i>Keila Robalo, Hugo Costa, Ricardo do Carmo e Eduardo Júlio</i>	
Avaliação da durabilidade de betões auto-compactáveis produzidos com agregados reciclados provenientes da indústria de pré-fabricação	1046
<i>Sara Santos, Pedro Raposeiro da Silva e Jorge de Brito</i>	
Avaliação da resistividade elétrica no concreto com agregados graúdos reciclados cerâmicos ...	1056
<i>Felipe Reis e Paulo Sérgio</i>	
Resistência ao corte de betões com agregados finos reciclados	1066
<i>Diogo Semedo, Luís Evangelista e Jorge de Brito</i>	

SESSÃO 5C – Análise Estrutural e Normalização

Integración de OpenSees en el software de CYPE	1077
<i>Javier Pereiro-Barceló e Manuel Fernández-Baños</i>	
Comprobación por software de anclajes a elementos de hormigón	1085
<i>Javier Pereiro-Barceló</i>	
Modelos de partículas para simulação de ensaios deformabilidade diferida do betão considerando explicitamente a mesoestrutura	1095
<i>Carlos Serra, Nuno Monteiro Azevedo, António Lopes Batista e Noemi Schlar</i>	
Análise de vigas de acoplamento de paredes de betão estrutural com modelos combinados de campos de tensões (1D/2D)	1105
<i>Miguel Pedrosa Ferreira, João F. Almeida e Miguel Sérgio Lourenço</i>	
Metodologia probabilística para avaliação de edificações com estrutura existente em betão armado	1115
<i>João Pantoja, Humberto Varum e António Abel Henriques</i>	

SESSÃO 5D – Análise Estrutural e Normalização

Comportamento de ancoragens de pré-esforço por aderência para o reforço de estruturas de betão às ações sísmicas	1126
<i>Tiago Vilhena, Válder Lúcio, Carla Marchão e Helisa Muhaj</i>	
Seismic strengthening of RC beams using post-tensioning with anchorages by bonding	1136
<i>Helisa Muhaj, Carla Marchão, Válder Lúcio e Ana Rita Gião</i>	
Seismic assessment of framed structures reinforced with superelastic shape memory alloy	1146
<i>Mohamed Abdelaziz e Mohamed Gomaa</i>	
Comportamento à compressão de pilares circulares de betão confinados por sistemas compósitos de FRP híbridos	1156
<i>Filipe Ribeiro, José Sena-Cruz, Fernando Garrido Branco e Eduardo Júlio</i>	
Estudos numéricos de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré esforçados	1166
<i>Luís Correia, José Sena-Cruz e Paulo França</i>	
Efeito da temperatura no comportamento de ancoragens mecânicas para confinamento transversal de FRP	1176
<i>José Sena-Cruz, Luís Correia e Cristina Barris</i>	

SESSÃO 6B – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Betão antigo e equipamento de ensaio: Museu de Engenharia Civil	1187
<i>Alcínia Zita Sampaio</i>	
Betões de edifícios galardoados com o Prémio Valmor de Arquitectura. Caracterização e contributos para a sua salvaguarda	1195
<i>Luís Almeida, António Santos Silva, Maria do Rosário Veiga, José Mirão e Manuel Vieira</i>	
Caracterização Experimental de Betões Pré-misturados sem Adição de Água	1205
<i>Carolina Freitas, Paulo Silva Lobo e Miguel Guimarães</i>	
Avaliação dos resultados de resistência à compressão de betão pronto produzido em centrais portuguesas	1215
<i>João Pacheco, Jorge de Brito, Carlos Chastre e Luís Evangelista</i>	
Adequação de ensaio de permeabilidade de concreto permeável em corpos de prova prismáticos	1225
<i>Arthur Aviz, Jayme Ribeiro e Luciana Cordeiro</i>	
Estudo paramétrico da armadura mínima requerida para controlo da fissuração, em elementos de BA espessos restringidos, baseada em análises termo-higro-mecânicas	1234
<i>Carlos Sousa, Miguel Azenha, Cláudio Ferreira e Rui Faria</i>	

SESSÃO 6C – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Previsão da capacidade de suporte de fundações profundas e análise dos materiais em relação às estacas hélice contínua	1245
<i>Ana Carolina Reis Lozovey e Fernea Aparecida João</i>	
Ambiente corrosivo: análise da deposição de cloretos e perspectiva da vida útil das estruturas de concreto armado em Aracaju/SE/BR	1255
<i>Ana Prata, Carlos Carvalho e Francisco Lopes</i>	
Levantamento de anomalias para a reabilitação estrutural e funcional de edifícios de betão armado	1265
<i>José Dias, António Santos, Armando Pinto, António Coelho, Luís Matias e Teresa Santos</i>	
Medição da corrosão de estruturas de betão armado com recurso à fotogrametria	1275
<i>Eduardo Cavaco, Rui Pimenta e Jónatas Valença</i>	

Considerações sobre o uso da Biocimentação para Reparação de Fendas em Vigas de Betão Armado	1285
<i>Rafaela Cardoso, António Monteiro, Gabriel Monteiro e Inês Flores-Colen</i>	
Influência da textura da superfície do furo e do nível de confinamento na capacidade resistente de ligações seladas no reforço de fundações com microestacas	1295
<i>David Marques, João Veludo e Pedro Santos</i>	

SESSÃO 6D – Materiais. Desempenho, durabilidade e impacto ambiental

Desenvolvimento do Ultra High Performance Reinforced Concrete (UHPFRC): uma proposta prática	1308
<i>Rosangel Rojas, Christa Kcorzenowski, Jose R. Yepez, Luiz C. Pinto, Américo Campos F. e Ronaldo Beraldin</i>	
Influência da corrosão no comportamento pós-fendilhação do betão reforçado com fibras de aço recicladas	1318
<i>Cristina Frazão, Joaquim Barros, José Bogas e Delfina Gonçalves</i>	
Numerical analysis for steel-fiber-reinforced concrete as a homogeneous material	1328
<i>Caio Matos e Aline Ramos</i>	
Otimização de um betão auto-compactável reforçado com fibras para a indústria de prefabricação	1340
<i>Paulo Fernandes, Hugo Rodrigues, João Veludo, João Baptista e Nuno Almeida</i>	
Energia de Fratura Interna a Altas Temperaturas de Betões Fibrosos de Alta Resistência b	1350
<i>Hugo Caetano e João Paulo C. Rodrigues</i>	

SESSÃO 7A – Realizações. Construção e reabilitação

Reforço Sísmico do Viaduto do Fonte Nova na 2ª Circular de Lisboa	1361
<i>Júlio Appleton, António Costa, João Sousa Dias e João Paulo Costa</i>	
Confronting the historical with the contemporary, a proposal for the new Alcantara Bridge	1172
<i>Jose Romo, Javier León e Julio Sánchez</i>	
Reabilitação e Beneficiação da Ponte de São João das Areias	1382
<i>Augusto Gomes e Francisco Virtuoso</i>	
Building the two largest High-Speed Railway arch bridges in the world with fully autonomous MMS	1392
<i>António Póvoas e Joana Delgado</i>	
Análise do colapso de um viaduto em concreto pré-esforçado: Viaduto Batalha dos Guararapes ..	1402
<i>Sebastião Salvador Real Pereira, Hermes Carvalho e Víctor Roberto Verga Mendes</i>	

SESSÃO 7B – PRÉMIO JOVENS MESTRES

Innovative building protection system against blast loads consisting of reinforced concrete facade panels supported by thin-walled steel energy absorption connectors	1413
<i>Vítor Pereira, Eduardo Júlio e Gabriel Gomes</i>	
Seismic analysis of structures: stress-resultant interaction based on response spectra	1423
<i>Ana Rita Tomaz</i>	
Comportamento à flexão de vigas de betão eco-eficientes e de ultra-elevada durabilidade	1433
<i>Ricardo Martins, Ricardo do Carmo, Hugo Costa e Eduardo Júlio</i>	
Pontes do tipo “Stress Ribbon” – Conceção e dimensionamento	1443
<i>Rita Almeida, Miguel Ferraz e Renato Bastos</i>	
Estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP: caracterização da aderência e do comportamento em flexão	1453
<i>Sérgio Soares</i>	

Análise da estabilidade da via num viaduto ferroviário para tráfego de comboios de alta velocidade	1463
<i>Artur Silva</i>	
Design of a pre-stressed bridge deck with ultra-high performance concrete (UHPC)	1474
<i>Rui Valente</i>	
Análises de placas de betão pré-esforçado com base no modelo de treliça com amolecimento ..	1484
<i>Ana Rita Lyrio, Luís Bernardo e Bernardo Horowitz</i>	

SESSÃO 7C – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Método de restauro para superfícies lisas em betão colorido	1495
<i>Judite Miranda, Jónatas Valença e Eduardo Júlio</i>	
Inspection and rehabilitation of fire-damaged reinforced concrete structures with NSM-CFRP strips	1506
<i>Ana S. Vieira, João P. Firmo e João R. Correia</i>	
Preventive and curative measures in heritage buildings due to settlements risk with consequent degradation of their masonry walls	1516
<i>José Dias</i>	
Avaliação do desempenho de resinas epoxídica em reparos de concreto à base de cimento Portland	1526
<i>Luiz A. Modesti, Alexandre S. Vargas e Eduardo L. Schneider</i>	
Análise de três soluções para proteção de estruturas sujeitas a explosões	1536
<i>Válter Lúcio, Gabriel Gomes e Cornel Cismasiu</i>	

SESSÃO 7D – Análise Estrutural e Normalização

Comportamento ao fogo de lajes de betão armadas com varões de GFRP: estudo experimental .	1547
<i>Inês C. Rosa, Pedro Santos, João P. Firmo e João R. Correia</i>	
Resposta sísmica de barragens abóbada. Estudo numérico sobre a influência da cota de água na albufeira	1556
<i>André Alegre, Sérgio Oliveira, Rafael Ramos e Margarida Espada</i>	
Análise de elementos de Betão Armado expostos ao incêndio após um sismo	1566
<i>Hugo Vitorino, Hugo Rodrigues e Carlos Couto</i>	
Efeito da Temperatura Ambiente na Resposta Sísmica de Estruturas de BA com Juntas Ligadas com SMA	1576
<i>Pedro Nunes e Paulo Silva Lobo</i>	
Resposta da ligação pilar-laje fungiforme sujeitas a ações horizontais cíclicas reforçadas com estribos	1586
<i>André Almeida, António Ramos, Rui Marreiros, Válter Lúcio e Ricardo Faria</i>	

SESSÃO 8A – Realizações. Construção e reabilitação

Grande Auditório da Nova SBE em Carcavelos - Um Projeto em Betão Estrutural de Geometria Singular	1597
<i>André Biscaya, José Oliveira Pedro e António Barreiros Ferreira</i>	
Edifício FPM41	1607
<i>Miguel Sérgio Lourenço, João F. Almeida e José N. Câmara</i>	
Estruturas e Fundações do novo Hospital Cuf Tejo em Lisboa	1619
<i>Júlio Appleton, António Costa, Nuno Travassos e Hugo Rodrigues</i>	
Hotel Savoy: Conceção e Projeto	1631
<i>José Câmara, Filipe Reis e André Fonseca</i>	

Edifícios Liberdade 203 em Lisboa	1643
<i>João Almeida, David Gama e Miguel Lourenço</i>	
Basilica do Divino Pai Eterno – Estrutura do Corpo Central	1653
<i>Filipe Conceição</i>	

SESSÃO 8B – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Desenvolvimento de painel sanduíche multifuncional para reabilitação sustentável de edifícios porticados de betão armado: caracterização de componentes	1665
<i>Christoph de Sousa, Joaquim Barros, João Ramôa Correia, Delfina Gonçalves e Miguel Azenha</i>	
Fabrico e Aplicação de Betão Branco Estrutural Leve com Agregados de Cortiça no Terminal de Cruzeiros de Lisboa	1674
<i>Jorge Galvão, Vitor Vermelhudo, Ricardo Ribeiro e Ângela Nunes</i>	
Análise experimental de ligações pilar-pilar em torres treliçadas em concreto pré-moldado para suporte de geradores eólicos	1687
<i>David Martins, Sueli Souza, Válder Lúcio, Carlos Chastre e Luiz Souza</i>	
Associação de múltiplos conectores tipo Perfobond para ligações aço-betão	1697
<i>Luís Costa Neves, Pedro Vellasco, Carlos Neto e Luciano Lima</i>	
Análise da viabilidade técnica da reutilização de resíduos de pedras ornamentais na fabricação de blocos de gesso sustentáveis	1707
<i>Victor Valério Landim da Silva, Gastão Coelho de Aquino Filho e Cicero Joelson Vieira Silva</i>	
Requisitos de Controle de Qualidade para Produção de Painéis Estruturais Pré-fabricados de Concreto	1719
<i>Karin Cangela Grabner e Maurício Silveira Martins</i>	

SESSÃO 8C – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Avaliação da ponte de ligação no ensaio de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado	1730
<i>José E. F. de Borba Júnior, Débora A. B. de Medeiros, Rodrigo M. da Silva, Tatiana A. E. Ewen e Timóteo C. Tarão e Victor H. D. de Oliveira</i>	
Desenvolvimento de plataforma robótica aérea integrada em ROS para inspeção de pontes de betão	1738
<i>André Araújo, Jónatas Valença, Micael Couceiro e Eduardo Júlio</i>	
Mapeamento de fendilhação em estruturas de betão através de classificação automática de imagem	1748
<i>Bruno Oliveira Santos, Jónatas Valença e Eduardo Júlio</i>	
Utilização da termografia para monitoramento de patologias presentes em pontes e viadutos	1758
<i>José E. F. de Borba Júnior, David de S. T. da Silva, Rodrigo M. da Silva, Julio S. do N. Mamede, Gustavo R. de S. Silva e Victor H. D. de Oliveira</i>	
NDT techniques for the analysis of anomalies related with durability - Heritage buildings with masonry walls and confining concrete elements	1767
<i>José Miranda Dias, Maria João Henriques, Luís Matias, Maria Sofia Ribeiro e Sónia Raposo</i>	
Monitorização de fendas em superfícies de betão através de análise de imagens multitemporais	1777
<i>Jónatas Valença, Bruno Oliveira Santos e Eduardo Júlio</i>	

SESSÃO 8D – Produtos e Processos. Construção e reabilitação

Avaliação das condições de segurança da Ponte-Cais do Porto de Pemba por meio de ensaio de carga de curta duração	1787
<i>Rafael Miguel Mabunda, Filda Miguel Langa e Américo Ocua Dimee</i>	

Ensaio dinâmico e modelação da ponte sobre o rio Itacaiúnas	1797
<i>Laura Souza, Romulo Antonio Chaves Lopes, Eloi Figueiredo, Dragos Ionut Moldovan, Jorge Antonio Moraes de Souza, Jairo de Jesus Rabelo, Ronyere Ferraz Moreira de Sousa, Plínio Glauber Carvalho dos Prazeres e João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa</i>	
Resistência última à flexão de lajes alveolares protendidas	1807
<i>Sebastião Pereira, Milton Dias, Elvio Piancastelli, Thiago Bortone e Elves Faria</i>	
Comportamento dinâmico da laje de betão armado de um viaduto ferroviário com solução estrutural mista aço-betão	1814
<i>Joel Malveiro, Carlos Sousa, Diogo Ribeiro e Rui Calçada</i>	
Ensaio dinâmico ambiente para avaliação dos danos na Ponte Antiga da Foz do Dão	1824
<i>Min Xu, Luís Oliveira Santos e Manuel Pipa</i>	

Grupo Português de Betão Estrutural
Av. do Brasil 101
1700-066 LISBOA
tel.: 218 443 307
gpbe@lnec.pt
www.gpbe.pt/

ISBN: 978-989-20-9043-6



9 789892 090436

